

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.015

考虑压升波动的磁悬浮压缩机机械性喘振主动控制

金贤松,袁杰,金阿龙,周德强,温素珍

(浙江青风环境股份有限公司,浙江 丽水 323000)

摘要:由于磁悬浮压缩机在深度喘振工况下,出口参数存在较大波动性,导致无法准确确定压缩机的喘振线,使得控制后喘振裕度较低,控制效果有限。为此,提出考虑压升波动的磁悬浮压缩机机械性喘振主动控制。依据磁悬浮压缩机在运行过程中出现机械性喘振现象的机制,构造设备集总参数方程,并根据不同转速下极限流量值的变化分析喘振线分布,进而构建压缩机系统模型。结合升压波动变化,将出口压力出现骤降并伴随周期性波动的点作为突变点,由此确定系统喘振点。结合主动控制原理,设计防喘振控制器,通过调整出口压升值,输出出口压力的补偿控制量,以此实现对压缩机喘振的主动控制。实验结果表明:利用所提方法对研究压缩机进行喘振控制后,喘振裕度明显提高,所提方法的应用性能更好。

关键词:压升波动;磁悬浮压缩机;集总参数;机械性喘振;工作点;主动控制

中图分类号:TH452 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0077-05

Active Control of Mechanical Surge in Magnetic Levitation Compressors Considering Pressure Rise Fluctuations

JIN Xiansong, YUAN Jie, JIN Along, ZHOU Deqiang, WEN Suzhen

(Zhejiang Qingfeng Environmental Co., Ltd., Lishui 323000, China)

Abstract: Due to significant fluctuations in the outlet parameters of the magnetic levitation compressor under deep surge conditions, it is difficult to accurately determine the surge line of the compressor, resulting in low surge margin after control and limited control effectiveness. Therefore, this paper proposes an active control method of mechanical surge in magnetic levitation compressors considering pressure rise fluctuations. Based on the mechanism of mechanical surge phenomenon during the operation of the magnetic levitation compressor, this paper builds a lumped parameter equation of the equipment, analyzes the distribution of surge lines according to the changes in limit flow values at different revolution speed, and constructs a compressor system model. Considering the increase in pressure fluctuation, the point where the outlet pressure suddenly drops and is accompanied by periodic fluctuations is identified as a sudden change point, and the system surge point is thus determined. Combining with the principle of active control, this research designs an surge-resistant controller, and outputs the compensation control quantity of the outlet pressure by adjusting the increase in outlet pressure to achieve active control of compressor surge. The results show that after applying the proposed method to control the surge of the research compressor, the surge margin of the system is significantly improved, and indicates that the application performance of the proposed method is better.

Keywords: pressure rise fluctuation; magnetic levitation compressor; aggregated parameters; mechanical surge; work point; active control

0 引言

由于操作条件的复杂性和可变性,磁悬浮压缩机在特定条件下可能会出现机械喘振。该问题不仅影响压缩机的稳定运行,还可能对设备造成损坏,甚至引发安全事故。特别是在考虑压力升高波动时,若无法准确捕捉喘振的前兆信号,则无法实现及时的主动干预。因此,对磁悬浮压缩机的机械喘振问题进行主动控制研究具有重要的理论价值和现实意义。

文献[1]通过对喘振的原因进行深入分析,采取优化管道系统设计以及减少管道内部的高低压差的方式,稳定流体流动,进而实现喘振抑制。该方法可以提供有针对性的解决方案,降低故障率。但不同的机组和运行环境可能会有所不同,某些控制方法可能不适用于所有情况,使得该方法的实际应用比较受限。文献[2]通过确定压缩机的喘振边界,建立了模糊逻辑控制器,将压缩机的运行参数(如入口压力、出口压力、流量等)作为输入,进行模糊化处理,形成模糊集,基于预设

第一作者简介:金贤松(1979—),男,浙江永嘉人,高级工程师,本科,研究方向为机电制造,wen77sz@163.com。

的模糊规则,对模糊集进行推理决策,得到控制输出。该方法能够处理不精确和不确定的信息,对压缩机运行过程中的各种干扰和变化具有较强的适应性。然而,模糊规则的制定往往依赖于经验数据。如果实证数据不足或不准确,可能会导致控制效果不佳。文献[3]实时监测离心式压缩机的运行参数,当入口流量降至喘振流量附近或以下时,系统会立即启动防喘振控制程序,控制系统将通过改变速度、调整阀门开度等策略,计算和调整压缩机的运行参数,以增加入口流量,使压缩机的工作点远离喘振区。该方法可以快速有效地防止喘振的发生,提高压缩机的运行效率。该技术在石化行业的离心式压缩机上具有良好的应用效果,但可能不适用于其他类型的压缩机或工业领域,导致控制性能还有待提高。文献[4]对压缩机的运行特性进行深入分析,了解喘振产生的机制和影响因素,并基于压缩机的数学模型,设计级联控制策略,以实现压缩机入口流量和压力的稳定控制。该方法在流量和压力方面具有更好的抗干扰能力,能够更好地应对压缩机运行过程中的各种干扰因素。但如果建立的系统数学模型不准确,则会导致最终控制效果较差。

针对以上分析,本研究提出一种考虑压升波动的磁悬浮压缩机机械性主动控制方法,以期丰富压缩机喘振控制的理论体系,而且为磁悬浮压缩机的稳定运行提供有效的技术支持。

1 磁悬浮压缩机机械性喘振主动控制方法设计

1.1 建立磁悬浮压缩机系统模型

喘振是磁悬浮压缩机运行过程中的一种不稳定现象,主要与流体机械和管道特性有关,通常表现为周期性的机械振动。喘振不仅影响压缩机的性能,还可能导致设备损坏甚至停机^[5]。通过建立磁悬浮压缩机系统模型,可以描述压缩机的动态特性、性能参数以及与其他系统部件的相互作用,从而预测压缩机在正常运行条件下的喘振点。

为建立能够精确描述压缩机设备性能参数以及喘振瞬态的系统模型,引入压缩机在运行过程中的无量纲出口流量 φ 和压力变化 ϕ ,确定压缩机的集总参数方程,表达式为

$$A(t) = \frac{B_0 \times \varphi}{\sum_{i=1}^n \phi \times \alpha_0} \quad (1)$$

式中: t 为运行时间; B_0 为计算矩阵; n 为采样次数; α_0 为压缩机入口流量。

当压缩机出现机械性喘振时,出口流量和压力变化以及喘振频率等出口参数存在较大的波动性,且喘振工况下不同转速对应的极限流量值也不相同^[6],将各个转速下的极限流量值相连,即可构成喘振线,具体如图1所示。

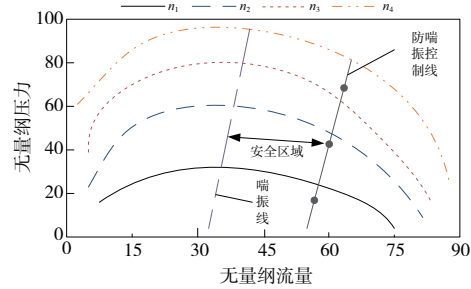


图1 喘振线与防喘振控制线分布

由图1可知,喘振线与防喘振控制线之间的区域为压缩机工作的安全区域^[7],其取值区间可表示为

$$\begin{cases} \varphi_{\max} = A(t) \times \beta_x \\ \varphi_{\min} = \frac{A(t)}{\sqrt{\|\kappa_0\|^2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: β_x 为 x 方向上的时间参数; κ_0 为与压缩机流量波动的相关参数; $\varphi_{\max}$ 、 $\varphi_{\min}$ 分别为出口流量的上限与下限。

采用节流特性函数描述压缩机的节流特性,并建立压缩机动力学特性方程和动量方程^[8],表达式为

$$\begin{cases} D_t = \frac{1}{s_0} (\varphi_{\max} + \varphi_{\min}) \\ F_t = j_0 (1 - \varphi_{\max} - \varphi_{\min}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: s_0 为流量扰动的一次谐波振幅; j_0 为调整系数; D_t 、 F_t 分别为压缩机的动力学方程和动量方程,其中 t 为运行时间。

进而可将压缩机的系统模型表示为

$$\Omega = \frac{\omega_0 \sqrt{D_t^2 \times F_t^2}}{B_1} \quad (4)$$

式中: ω_0 为亥姆霍兹频率; B_1 为比例系数。

根据磁悬浮压缩机在运行过程中出现机械性喘振现象的产生机制,构造设备集总参数方程,并基于喘振线和喘振控制线的分布情况,设计压缩机动力学和动量方程,进而构建压缩机系统模型,为接下来确定喘振点奠定基础。

1.2 考虑压升波动的磁悬浮压缩机喘振点确定

喘振点是压缩机在特定操作条件下开始出现喘振现象的临界点。为了有效地控制喘振,必须准确地确定这一临界点,并根据压缩机的运行状态和工作条件制定相应的喘振预防措施和控制计划,使其远离喘振点,避免喘振现象的发生^[9]。

基于压缩机实时运行数据,结合设备系统模型,利用拟合参数的方法建立压缩机性能曲线,表达式为

$$N = q_m \Omega / b_0 \quad (5)$$

式中: q_m 为多变指数; Ω 为系统模型; b_0 为分辨率。

喘振现象会导致压缩机出口压力出现急剧下降和周期性大幅波动^[10]。因此,在确定喘振点时,应考虑升压波动这一因素,则采样点 i 处的压比可由下式计算,即

$$r_i = \frac{N \cdot k_s}{t_0 \cdot y_0 / g_q} \quad (6)$$

式中: k_s 为压缩机转速; t_0 为监测时间; y_0 为体积流量; g_q 为属性约束。

根据压差信号与工作点位置,确定 y 方向上的压缩机喘振时的基本设定值^[11],即

$$h_y = r_i \left[\frac{p_x \times g_p}{f_0 (d_1 + d_2)} \right] \quad (7)$$

式中: p_x 为压力设计值; g_p 为压差信号; f_0 为压力测量值; d_1 、 d_2 分别为预测尺度下和标准尺度下压力的修正值。

根据喘振瞬态与升压波动之间的关系,将出口压力出现骤降并伴随周期性波动的点作为喘振点,计算公式为

$$P_y = h_y \times \lambda_0 \times \rho \quad (8)$$

式中: λ_0 为入口压力; ρ 为空气密度; P_y 为 y 方向上的出口压力波动幅值。将波动最大的幅值点对应的工作点看作为喘振点,由此完成喘振点的确定,为后续实现喘振主动控制提供有利条件。

1.3 压缩机喘振主动控制

综合考虑压缩机的安全工作区域、运行效率与喘振风险之间的关系,本文采用主动控制法设计一种压缩机喘振控制方案^[12]。其原理是通过在系统中添加专用主动控制机构来改变压缩机自身的力学性能,将其控制在喘振线的左侧进行运行,从而使设备的安全工作区间得到拓宽,进而对喘振现象进行遏制。

由于喘振导致的直接影响是出口压力明显偏

高。因此,基于主动控制的基本思路,设计喘振控制器,通过调整控制量偏差,补偿压缩机的出口压力,以抵消由于喘振现象引起的压升值^[13]。

首先利用多个采样点替代连续的采样时间,得到控制表达式为

$$e(n) = P_y + K f_g \quad (9)$$

式中: K 为采样周期; f_g 为比例控制参数。

将计算控制量与输出值的偏差进行叠加,得到离散控制值的偏差变化率^[14],即

$$q_b = \frac{e(n) \varepsilon_0 \times \vartheta_0}{\xi_k} \quad (10)$$

式中: ε_0 为调整偏差; ϑ_0 为微分变量; ξ_k 表示经验常数,其中 k 表示系统模态阶次编号。

根据控制量对应的隶属度函数,确定防喘振控制中 y 方向上的压缩机流量偏差^[15],公式为

$$\varphi_y = \frac{q_b}{\Delta p_u / a_0} \quad (11)$$

式中: Δp_u 为控制超调量; a_0 为平均粒度。

进而设计扩张状态观测控制器,即

$$M = \varphi_y \delta_1 (e_1 - z_1) \quad (12)$$

式中: δ_1 为输入增益; e_1 为观测变量; z_1 为观测增益。

将压缩机的出口升压值输入控制器中,输出节流参数的控制量,以补偿抵消喘振现象,表达式为

$$u(M) = \frac{\omega_0 \cdot \lambda_k}{c_x} \quad (13)$$

式中: ω_0 为设定的压缩机在稳定工作状态下的出口压升值; λ_k 为衰减常数; c_x 为 x 方向上的权函数; $u(M)$ 为控制器输出的触控压力控制量。

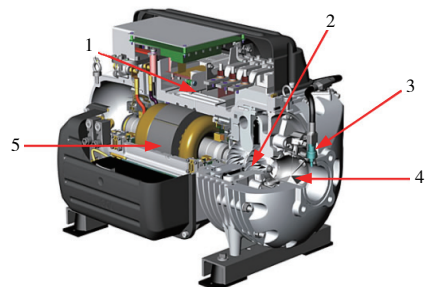
根据压缩机喘振主动控制原理,设计防喘振控制器,并通过调整出口压升值,输出出口压力的补偿控制量,以此实现对压缩机喘振的主动控制。

2 实例论证分析

在完成理论部分的设计后,设计仿真对比实验环节,将本文提出的考虑压升波动的磁悬浮压缩机机械性喘振主动控制方法应用在实际运行的磁悬浮压缩机中,并对其进行喘振控制,根据实验结果分析本文方法的有效性。

2.1 实验准备

本次实验以某管道压气站型号为 DLF-11.0X 的磁悬浮离心压缩机为研究对象。该压缩机具有低噪声、低振动的特点,其基本构造如图 2 所示。



1—速度控制; 2—两级叶轮; 3—压力温度传感器;
4—导叶; 5—同步直流电机。

图2 磁悬浮压缩机基本构造

该磁悬浮离心压缩机的运行参数如表1所示。

表1 压缩机运行参数

项目	参数
制冷剂	R134A
轴心高度/mm	250
冷冻量/kW	631.3
额定功率/kW	195
输入电压范围/V	380~415
输入频率范围/Hz	50~60
电流/A	280
冷却方式	水冷
振动/ μm	≤ 5
噪声水平/dB(A)	≤ 75
排气压力范围/MPa	0.4~1.0
转速范围/(r/min)	1 000
排气量/(m^3/h)	1 000
尺寸(长×宽×高)/mm	1 500×1 200×1 800

采用传感器实时监测压缩机运行状态,包括压力、温度和振动等参数。共采集了 600 min 的压缩机入口流量、出口流量和出口压力数据,并根据压升波动变化情况确定压缩机的机械性喘振临界点,结果如图3所示。

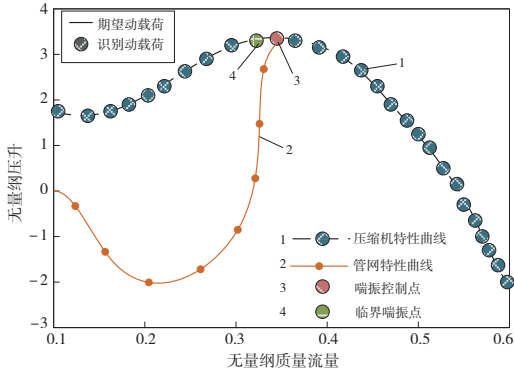


图3 压缩机喘振点确定结果

实验平台包括磁悬浮压缩机本体、控制系统、数据采集和分析系统以及模拟压力上升波动的装置。磁悬浮压缩机为具有代表性和稳定性的性能模型;控制系统应能够实现对压缩机转速和排气压力等参数的精确控制;数据采集与分析系统能采集压缩机的实时运行状态数据,并对其进行处理和分析;模拟压力上升波动的装置用于模拟不同幅度和频率的压力上升波动,以模拟实际运行中的复杂运行条件。

设置压缩机转速在 2 000~4 000 r/min 之间;排气压力在 0.5~1.5 MPa 之间可调;模拟升压波动幅度为 0.1~0.3 MPa,波动频率为 1~10 Hz;阀门开度变化速率限制为每秒 5%;不限制阀门关闭速度;向右侧(安全方向)的安全区跟踪设置为即时响应;向左侧(危险方向)移动时,设置移动速率限制为每秒 2%,并确保设定不会越过喘振控制线。控制算法参数设置如下。比例系数 $B_1 = 2.5$,积分时间 $T_i = 10 \text{ s}$ 。

基于以上实验准备与参数设定,对所提方法的控制性能进行测试与分析。

2.2 压缩机喘振控制结果与分析

实验中引入基于 PLC 压缩机喘振控制方法(方法 1)、基于大数据技术的压缩机喘振控制方法(方法 2)作为本文方法的对比方法。分别采用 3 种方法对该磁悬浮离心压缩机进行喘振主动控制,实验结果如图4所示。

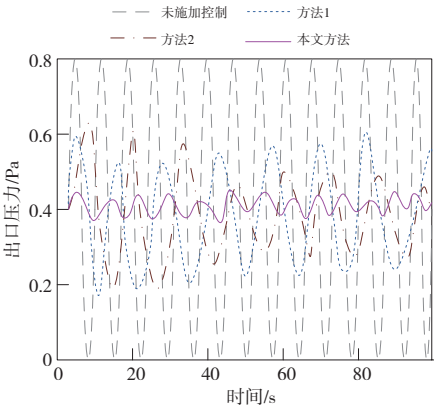


图4 压缩机喘振控制结果

根据图4可知,在没有任何控制干预的情况下,压缩机在深度喘振工况时的出口压力变化满足周期性振动规律,且未施加控制前系统振动的压升振幅为 0.800 Pa。采用本文设计的方法对其进行主动控制后,压缩机出口压力幅值显著降低,数值从原来的 0.800 Pa 降至 0.413 Pa,且上下波

动程度较小,说明振动幅值被完全抑制下来;而经过方法 1 和方法 2 进行控制后,虽然压升幅值存在一定程度的降低,但效果并不显著。设备压升幅值分别为 0.596 Pa 和 0.624 Pa,波动程度较大,没有达到喘振控制的目的。分析这两种方法性能不佳的原因主要是由于无法准确、快速地响应压缩机出口压力的变化,从而无法有效抑制喘振现象。通过实验结果可以证明本文方法在磁悬浮压缩机喘振主动控制中的有效性。

2.3 对比实验分析

为进一步体现本文方法的优越性能,采用喘振裕度这一指标对对照组方法和本文方法的喘振控制效果进行评价。喘振裕度值越高,说明压缩机的安全工作范围越大,在相同工况下距离喘振边界的距离越远,系统出口压升变化波动较小,喘振控制效果更好,对比结果如表 2 所示。

表 2 基于不同控制方法的系统喘振裕度对比

仿真次数	初始喘振裕度/%	控制后喘振裕度/%		
		方法 1	方法 2	本文方法
1	5.0	11.2	12.6	15.6
2	6.2	9.3	11.0	12.3
3	7.4	9.9	12.5	14.6
4	6.6	8.0	9.1	11.5
5	5.8	7.1	8.4	9.8
6	7.0	13.5	12.7	19.7
7	6.5	10.2	14.6	20.3
8	8.0	12.3	15.0	22.6
9	7.9	9.6	14.9	21.7
10	5.7	8.8	10.2	17.6

由表 2 中的数据可以看出,利用所提方法对压缩机进行主动控制后,与控制前相比,喘振裕度得到的显著提高,表明本文方法能够较好地控制压缩机喘振现象。而方法 1 和方法 2 虽然也能够提升压缩机的喘振裕度,但整体控制效果不如本文方法,说明这两种方法在喘振控制上的效果有限,无法满足实际应用需求。证明本文方法能够有效控制压缩机喘振现象,且控制效果更好。

3 结语

本文在深入研究考虑压升波动的磁悬浮压缩机机械喘振主动控制过程中,采用了先进的控制

算法,通过调整压缩机的出口参数,实现了对压缩机喘振的主动控制,为了解磁悬浮压缩机的喘振机制提供了一个新的视角,也为其他类型压缩机的喘振控制提供了有益的参考。

参考文献:

- [1] 吴迪,李敏. 商用离心式冷水机组喘振分析与控制[J]. 中国高新科技,2023(22):122-124.
- [2] SHEHATA R S, ABDULLAH H A, AREED F F G. Fuzzy logic surge control in constant speed centrifugal compressors [C]//2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Niagara Falls, ON, Canada: IEEE, 2008:653-658.
- [3] 付嘉宁,周家怡. 一种石油化工离心压缩机防喘振控制技术[J]. 中国科技信息,2023(20):107-109.
- [4] 单光胜,任正云,叶大山. 离心式压缩机防喘振控制算法设计[J]. 自动化技术与应用,2023,42(10):15-19.
- [5] 严盛超,范振华. 离心式压缩机防喘振控制解析[J]. 设备管理与维修,2023(17):87-89.
- [6] 梁帅帅,代子阳,冯海浩,等. 国六涡轮增压柴油机喘振机理与喘振控制研究[J]. 车用发动机,2023(3):46-51.
- [7] MCNULTY, GREGORY SCOTT. A study of dynamic compressor surge control strategies for a gas turbine engine [J]. Massachusetts Institute of Technology, 2023, 27(15):367-368.
- [8] 关旭东,周瑾,金超武,等. 磁悬浮流体机械喘振控制研究[J]. 振动工程学报,2023,36(2):554-564.
- [9] 葛昕炜,褚瑞华,傅江东,等. 离心式压缩机防喘振控制方法[J]. 流程工业,2023(3):40-43.
- [10] 曾庆天. 浅谈离心式压缩机的防喘振控制[J]. 科技风,2023(4):62-64.
- [11] 孙振中,温孟阳,范腾博,等. 特斯拉阀对压气机深度喘振影响研究[J]. 推进技术,2023,44(1):60-69.
- [12] 李英俊,袁利剑,袁大辉. 综合控制系统在压缩机防喘振控制中的应用[J]. 石油化工自动化,2003(6):23-25.
- [13] 闫思齐,李本威,王永华,等. 基于台架试验的涡轴发动机喘振发生位置规律[J]. 航空动力学报,2022,37(2):263-273.
- [14] 吴庆龙,杨赫,赵栢杨,等. 离心式压缩机防喘振自动控制技术研究[J]. 石油和化工设备,2023,26(9):19-21.
- [15] 郑海生,万真武. 高炉鼓风防喘振控制策略研究[J]. 冶金动力,2023,42(2):55-58.

收稿日期:2024-07-11